

УДК 699.86

**ТЕПЛОЗАЩИТНЫЕ СВОЙСТВА ДВУСЛОЙНЫХ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ НА ОСНОВЕ КОМПОЗИЦИОННОГО ПЕНОПЛАСТА****<sup>1</sup>Аксенов Б.Г., <sup>1</sup>Стефурак Л.А., <sup>2</sup>Стефурак П.Б.**<sup>1</sup>*Тюменский индустриальный университет, Тюмень, e-mail: aksenovbg@tyuiu.ru, stefurak@yandex.ru;*<sup>2</sup>*ООО «Газпром геологоразведка», Тюмень, e-mail: stefurakPB@yandex.ru*

Композиционный пенопласт прокладочный имеет неоднородную структуру, его плотность нелинейно увеличивается от центра к поверхностям. Чистые пенопласты имеют открытые поры, что способствует прогрессированию процесса влагопереноса при эксплуатации. Увлажнение ведет к изменению структуры материала, существенной потере долговечности, ухудшению теплозащитных свойств панелей. Пенопласт прокладочный имеет закрытые поры, поэтому у него меньшая сорбционная влажность при тех же условиях. Исследования показали, что влагосодержание утеплителя стабильно в пределах 3–7%. Кроме того, пенопласт прокладочный обладает и значительной несущей способностью. Такие материалы можно применять в качестве утеплителей для многослойной конструкции без дополнительной защиты от влажности ее внутренней стороны. Композиционный пенопласт – материал трудносгораемый, поэтому стало возможным использовать его в качестве утеплителя в двухслойных кровельных панелях без дополнительного металлического слоя. В статье исследуются физико-механические свойства, теплозащитные характеристики нового строительного материала. На приборах для нахождения теплофизических характеристик получена зависимость коэффициента теплопроводности пенопласта от влагосодержания, плотности и температуры, которая была применена в скорректированной методике определения сопротивления теплопередаче двухслойной ребристой панели. Определение коэффициента теплопроводности в лабораторных условиях, близких к реальным, обуславливает улучшение качества расчета теплозащитных свойств двухслойных кровельных панелей утепленных пенопластом прокладочным.

**Ключевые слова:** теплоизоляционные материалы, физико-механические свойства, сопротивление теплопередаче

**HEAT-SHIELDING PROPERTIES OF DOUBLE-LAYER FENCING STRUCTURES BASED ON COMPOSITE FOAM PLASTIC****<sup>1</sup>Aksenov B.G., <sup>1</sup>Stefurak L.A., <sup>2</sup>Stefurak P.B.**<sup>1</sup>*Industrial University of Tyumen, Tyumen, e-mail: aksenovbg@tyuiu.ru, stefurak@yandex.ru;*<sup>2</sup>*Gazprom Geologorazvedka LLC, Tyumen, e-mail: stefurakPB@yandex.ru*

Composite foam plastic has a heterogeneous structure – its density increases nonlinearly from the center to the surfaces. Clean foams plastic have open pores, which contributes to the progression of moisture transfer during operation. Humidification leads to a change in the structure of the material, a significant loss of durability, which worsens the thermal properties of the panels. Foam plastic has closed pores, so it has lower sorption humidity under the same conditions. Studies have shown that the moisture content of the insulation is stable within 3–7%. In addition, the foam plastic has a significant bearing capacity. Such materials can be used as insulation for multi-layer construction without additional protection from the humidity of its inner side. Composite foam plastic material is difficult to burn, so it became possible to use it as insulation in two-layer roofing panels without additional metal layer. The article examines the physical and mechanical properties, heat-shielding characteristics of the new building material. The dependence of the thermal conductivity of the foam plastic on the moisture content, density and temperature, which was used in the corrected method for determining the heat transfer resistance of a two-layer ribbed panel, was obtained on the devices for finding thermal characteristics. Determination of the coefficient of thermal conductivity in the laboratory conditions, close to the real, causes an improvement in the quality of calculation of heat-shielding properties of double-layer roofing panels insulated with foam cushioning.

**Keywords:** thermal insulation materials, physical and mechanical properties, heat transfer resistance

При обустройстве газоконденсатных месторождений в северных регионах, где преобладают вечномёрзлые грунты с включениями льда, защищают грунты от воздействия сооружений качественной тепловой изоляцией основания. Используемые для этого пенопласты имеют открытые поры, что способствует прогрессированию процесса влагопереноса в процессе эксплуатации. Увлажнение материала, если оно происходит в условиях фазового перехода пара в воду и воды в лед, ведет к изменению его структуры, существенной потере долговечности, что

ухудшает теплозащитные свойства панелей. Добавление в состав пенопласта наполнителей переводит его в композиты, позволяет целенаправленно изменять свойства. Новые композиционные материалы можно создавать с заданными качествами, близкими природным [1]. Так материал с неоднородной плотностью, имеющий закрытые поры, будет иметь меньшую сорбционную влажность при тех же условиях. Кроме того, он будет обладать и значительной несущей способностью. Такие материалы можно применять в качестве утеплителей для многослойной

конструкции без дополнительной защиты от влажности ее внутренней стороны.

Пенопласт прокладочный – новый тип композиционного пенопласта [2, 3], плотность материала увеличивается от центра к поверхности. Высокие физико-механические свойства композиционного пенопласта делают возможным применять его в качестве утеплителя в двуслойных кровельных панелях без дополнительного металлического слоя. Возникла необходимость в исследовании теплотехнических характеристик композиционного пенопласта, обусловленных его неоднородной плотностью. Данная статья посвящена технологии использования этого материала и его физико-механическим свойствам.

### Материалы и методы исследования

Физико-математическая модель образования пенопласта прокладочного изложена в работе [3]. Основываясь на разработанной математической модели, рассчитано, что 82–88% наполнителя (вермикулита) будет находиться в области корки композита и только остальные 12–18% – в его средней части.

Композиционный пенопласт обладает высокой стойкостью к воздействию пламени благодаря тому, что его поверхностная корка состоит из слоя вермикулита.

Пенопласт имеет убедительно выраженное распределение плотности по толщине слоя. Так плотность верхней и нижней корки  $230\text{--}250 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ , плотность его в средней части –  $80 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ .

Пенопласт прокладочный имеет повышенную прочность при продавливании и изгибе, благодаря своей структуре. Предел прочности пенопласта при изгибе 0,35 МПа, модуль упругости при сжатии 22 МПа.

Применение пенопласта в двуслойных конструкциях без одной металлической обшивки должно быть обосновано его прочностными показателями. Твердость материала определялась по методике нахождения прочности неметаллического поверхностного слоя на продавливание с помощью штампа круглого сечения. В зависимости от значения прочности материала на изгиб, выбирался диаметр штампа. Испытания проводились на разрывной машине. Штамп закрепляется в верхнем захвате прибора, приводится в соприкосновение с поверхностью образца размерами  $0,1 \times 0,1 \times 0,05$  м и вдавливается в образец. Прочность на продавливание пенопласта – 2,5 МПа.

Физико-механические свойства композиционного пенопласта позволили применить его в качестве утеплителя кровельных двуслойных панелей.

Панели кровельные двуслойные с пенопластом прокладочным имеют размеры  $9 \times 0,7 \times 0,12$  м. Пенопласт прокладочный – материал трудногораемый, поэтому стало возможным использовать его в качестве утеплителя в двуслойных кровельных панелях без дополнительного металлического слоя, так как панель укладывается профнастилом вверх. Температура наружной поверхности панелей может изменяться от  $-50$  до  $+70$  °С, а внутренней – не выше  $60$  °С; влажность воздуха в помещении – не выше 60%.

Это устройство кровли позволяет исключить стадию выполнения гидроизоляционных работ, значительно уменьшает стоимость установки кровли, уменьшает количество используемого металла. Кроме того, композиционный пенопласт может выполнять и функцию декоративного облицовочного материала (рис. 1).



Рис. 1. Панель кровельная двуслойная

Влагосодержание пенопласта двуслойной панели определяли в течение 60 суток по слоям. Первый слой (без металлической защиты) – глубина 0,01 м, второй слой – глубина 0,02 м, третий слой – глубина 0,03 м.

Расчет вели по формуле

$$u = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \cdot 100,$$

где  $u$  – влагосодержание образца;  $m_1$  – масса высушенного образца;  $m_2$  – масса увлажненного образца.

Влагосодержание в образцах повышалось в течение 20 суток, после чего процесс стабилизировался, в последующий период наблюдалось небольшое повышение влажности (рис. 2).

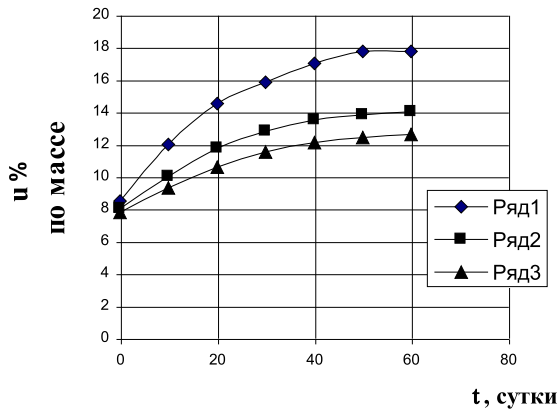


Рис. 2. Влажность пенопласта прокладочного: 1 – первый слой; 2 – второй слой; 3 – третий слой

Зависимость влажности от времени и толщины слоя утеплителя можно задать в виде

$$u = 11 \frac{\tau^\alpha}{h^\beta},$$

где  $\tau$  – время;  $h$  – толщина пенопласта;  $\alpha = 0,14$ ;  $\beta = 0,12$ .

Полевые испытания утеплителя на влагонасыщение проводили зимой на элементе панели кровельной двуслойной размерами  $0,35 \times 0,5 \times 0,01$  м, который поместили в окне, профнастилом наружу. Температура наружного воздуха  $t_{н.в.} = -25^\circ\text{C}$ , температура внутреннего воздуха  $t_{в.в.} = 20^\circ\text{C}$ . Эксперимент длился 40 суток. За это время влажность утеплителя изменилось с 3 до 7%. При этом влажность внутренне-

го (незащищенного) слоя элемента панели было от 3 до 4% и от 6 до 7% – у поверхности защищенной металлом.

Потери тепла через площадь наружной поверхности панели определяются теплопроводностью пенопласта, величина которой существенно меняется при изменении значений влагосодержания материала и от температуры окружающей среды [3, 4].

Для исследования влияния влагосодержания и температуры на значения коэффициента теплопроводности пенопласта была использована установка нахождения теплофизических характеристик плоских образцов. Метод позволяет из одного эксперимента установить зависимости теплопроводности образца от температуры, использовать образцы произвольных размеров. Опыты ставили на образцах размерами  $0,25 \times 0,2 \times 0,06$  м. Температура поддерживалась в диапазоне  $-20, +20^\circ\text{C}$ , плотность теплового потока на наружной поверхности –  $20 \dots 40 \text{ Вт/м}^2$ .

Исследования показали, что коэффициент теплопроводности пенопласта увеличивается с увеличением влагосодержания образца и возрастает с увеличением температуры (рис. 3). Повышение коэффициента теплопроводности при отрицательных температурах объясняется высвобождением связанной воды в порах, наличием в порах пенопласта льда – «мостиков холода».

Исследования показали, что пенопласт прокладочный как утеплитель в двуслойной кровельной панели обладает необходимыми защитными свойствами

Пенопласт прокладочный имеет неравномерно распределенную плотность (рис. 4), что во многом определяет его свойства.

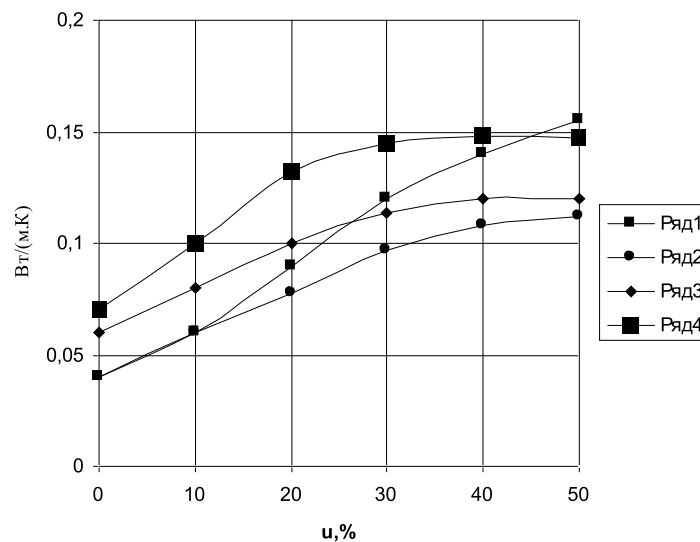


Рис. 3. Коэффициент теплопроводности пенопласта прокладочного: 1 –  $-15^\circ\text{C}$ , 2 –  $0^\circ\text{C}$ , 3 –  $25^\circ\text{C}$ , 4 –  $45^\circ\text{C}$

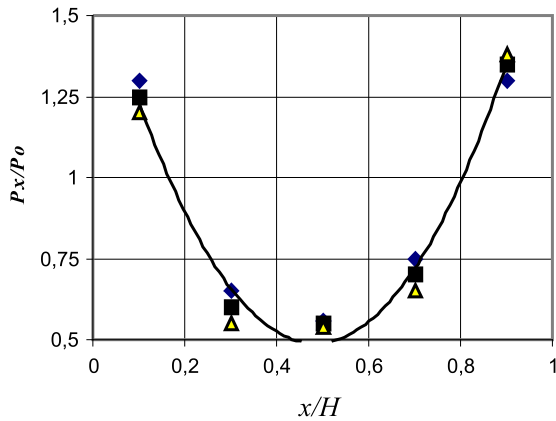


Рис. 4. Плотность пенопласта прокладочного

В теплотехнических расчетах ограждающих конструкций следует модифицировать методику так, чтобы значения теплофизических характеристик отражали их фактическую зависимость от значений влажности и температуры.

Формула расчета сопротивления теплопередаче двуслойной ребристой панели (рис. 5) по СНиП 23-02-2003, [5]:

$$R_0 = \left( \frac{1}{\alpha_{в.п.}} + R_K + \frac{1}{\alpha_{н.п.}} \frac{F_{в.п.}}{F_{н.п.}} \right) \frac{1}{\epsilon}$$

где  $\alpha_{в.п.}$  – внутренний коэффициент теплообмена;  $R_K$  – термическое сопротивление панели;  $\alpha_{н.п.}$  – наружный коэффициент теплообмена;  $F_{в.п.}$ ,  $F_{н.п.}$  – соответственно площади внутренней и наружной поверхностей панели;  $\epsilon$  – коэффициент профиля ребра панели.

Корректировка методики расчета  $R_K$  состоит в использовании зависимости

$\lambda = f(t, u, \rho_0)$ . Эта зависимость для пенопласта прокладочного получена на приборах для нахождения теплофизических характеристик:

$$\lambda = 0,03682 + 0,000343t + 0,0000257\rho_0 + (-0,00246 + 0,0000565t + 0,0000348\rho_0) \times \frac{u}{1 + 0,01 \cdot u}$$

Для расчета ограждающая конструкция (рис. 5) представляется состоящей из  $n$  элементарных слоев. Сопротивление

$R_K = \sum_{i=1}^n R_i$ , где  $R_i$  – сопротивление теплопередаче элементарного слоя [6]. За толщину  $\Delta x$  элементарного слоя выбирают наименьшее из  $\Delta x_i$ , исходя из условия однородности в нем температурного поля, определяемое неравенствами

$$\left| \frac{2(\lambda_{x_{i+1}} - \lambda_{x_i})}{(\lambda_{x_{i+1}} + \lambda_{x_i})} \right|_{u, \rho_0 = const} \leq 0,05;$$

$$\left| \frac{2(\lambda_{x_{i+1}} - \lambda_{x_i})}{(\lambda_{x_{i+1}} + \lambda_{x_i})} \right|_{t, \rho_0 = const} \leq 0,05;$$

$$\left| \frac{2(\lambda_{x_{i+1}} - \lambda_{x_i})}{(\lambda_{x_{i+1}} + \lambda_{x_i})} \right|_{t, u = const} \leq 0,05.$$

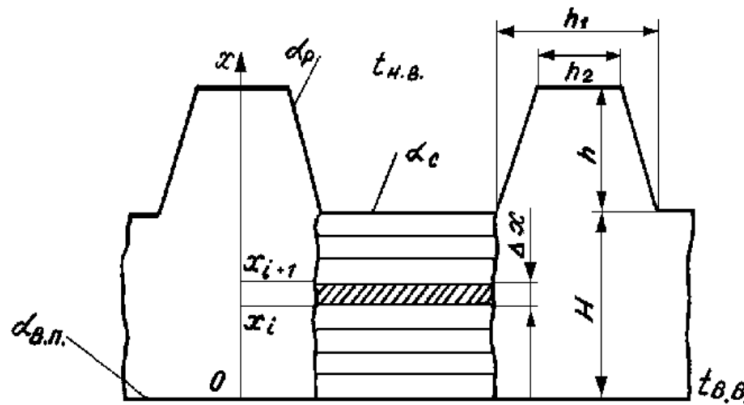


Рис. 5. Схема двуслойной панели

### Результаты исследования и их обсуждение

Расчет панели кровельной двуслойной с пенопластом прокладочным выполнили по откорректированной методике, учитывающей влияние влагосодержания, пористости материала и температуры на коэффициент теплопроводности. Габаритные размеры панели:  $h_2 = 0,05$  м,  $h_1 = 0,08$  м,  $h = 0,08$  м,  $H = 0,08$  м, при  $t_{в.п.} = 20^\circ\text{C}$ ,  $t_{н.п.} = -25^\circ\text{C}$ ,  $\Delta t^m = 8\text{K}$ ,  $\alpha_{в.п.} = 8,7 \text{ м}^2\text{K/Вт}$  и  $\alpha_{н.п.} = 23,2 \text{ Вт/(м}^2\text{K)}$  значение  $R_0 = 2,16 \text{ м}^2\text{K/Вт}$ .

По нормативной методике при  $t_{в.п.} = 20^\circ\text{C}$  и  $t_{н.п.} = -25^\circ\text{C}$  для условий А сопротивление теплопередаче панели –  $1,78 \text{ м}^2\text{K/Вт}$ .

Были проведены фактические испытания сорока восьми утепленных двуслойных кровельных панелей [7], сопротивление теплопередаче панели –  $2,18 \text{ м}^2\text{K/Вт}$ .

Наиболее близкими к фактическим оказались расчетные значения сопротивления теплопередаче по скорректированной методике.

С понижением значений минусовых наружных температур данный метод расчета сопротивления теплопередаче двуслойных кровельных панелей еще более эффективен.

### Выводы

Методика определения коэффициента теплопроводности в лабораторных усло-

виях, близких к реальным, обуславливает улучшение качества расчета теплозащитных свойств двуслойных кровельных панелей, утепленных пенопластом прокладочным.

Благодаря выполненным исследованиям стало возможным пенопласт прокладочный использовать в нефтегазопромышленном строительстве. Панели применены при обустройстве Ямбургского газоконденсатного месторождения.

### Список литературы

1. Власенко Ф.С., Раскутин А.Е. Применение полимерных композиционных материалов в строительных конструкциях // Труды ВИАМ. 2013. № 8. С. 31–38.
2. Макридин Н.И. Структурообразование и конструкционная прочность цементных композитов. М.: МГСУ, 2013. 152 с.
3. Аксенов Б.Г., Кутушев А.Г., Стефурак Л.А. Теплоизоляционный материал интегральной структуры // Доклады СО АН ВШ. 2003. № 2 (8). С. 65–72.
4. Колосова А.С., Сокольская М.К., Виткалова И.А., Торлова А.С., Пикалов Е.С. Наполнители для модификации современных полимерных композиционных материалов // Фундаментальные исследования. 2017. № 10–3. С. 459–465.
5. СНиП 23-02-2003. Тепловая защита зданий. Thermal performance of the buildings. СПб.: ДЕАН, 2004. 64 с.
6. Лисянский В.П., Блинов С.А. Применение новых материалов в фортификационном строительстве. СПб.: СПбГПУ, 2015. 78 с.
7. ГОСТ 25380-2014 Здания и сооружения. Метод измерения плотности тепловых потоков, проходящих через ограждающие конструкции. М.: Стандартинформ, 2015. 11 с.